

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-116103

(43)Date of publication of application : 19.04.2002

(51)Int.Cl. G01L 9/00
G01B 9/02
G01J 5/08
G01J 5/10
// G01J 9/02

(21)Application number : 2000-304957 (71)Applicant : OKI ELECTRIC IND CO LTD

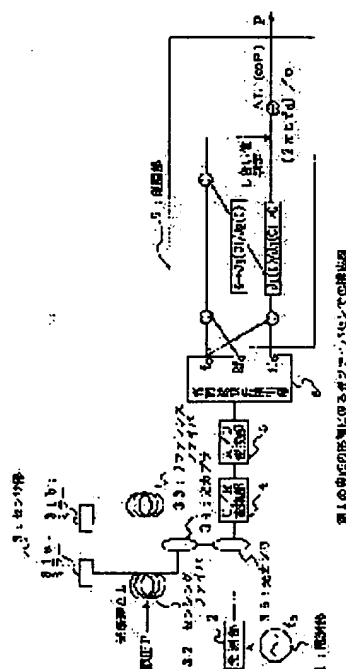
(22)Date of filing : 04.10.2000 (72)Inventor : NAKAJIMA YASUYUKI

(54) OPTICAL FIBER SENSOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical fiber sensor capable of measuring quasi-static physical quantities such as temperature and depth.

SOLUTION: This optical fiber sensor has a light source part 2 for sending out a frequency-modulated laser beam and a sensing optical fiber 32 for changing the length being an optical path according to a physical quantity of a measuring object, and has a sensor part 3 for making the reflected laser beam interfere with a reference laser beam by passing the laser beam sent out of the light source part 2 through the sensing optical fiber, an O/E converting part 4 for converting the interfered laser beam into an electric signal, a higher harmonic wave component extracting part 6 for extracting a higher harmonic wave component included in the interfered laser beam on the basis of the electric signal, and a demodulating part 7 for calculating an optical path difference ΔL and static pressure P on the basis of a modulation index C when judged as being in an allowable error range on the basis of a phase difference ϕ ; of the interfered light by calculating the phase difference and the modulation index C of the interfered light on the basis of the amplitude ratio of the extracted higher harmonic wave component.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2002-116103
(P2002-116103A)

(43)公開日 平成14年4月19日(2002.4.19)

| (51)Int.Cl. ⁷ | 識別記号 | F I | テームト [*] (参考) |
|--------------------------|------|--------------|------------------------|
| G 0 1 L | 9/00 | C 0 1 L 9/00 | B 2 F 0 5 5 |
| G 0 1 B | 9/02 | C 0 1 B 9/02 | 2 F 0 6 4 |
| G 0 1 J | 5/08 | C 0 1 J 5/08 | A 2 G 0 6 6 |
| | 5/10 | 5/10 | E |
| // G 0 1 J | 9/02 | 9/02 | |

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 20 頁)

(21)出願番号 特願2000-304957(P2000-304957)
(22)出願日 平成12年10月4日(2000.10.4)

(71)出願人 000000295
沖電気工業株式会社
東京都港区虎ノ門1丁目7番12号
(72)発明者 中島 康行
東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気
工業株式会社内
(74)代理人 100061273
弁理士 佐々木 宗治 (外3名)
Fターム(参考) 2F055 AA40 BB20 CC11 DD07 EE31
FF11 GG31 GG49
2F064 CC01 EE01 EED4 GG02 GG24
HH05 JJ04 JJ15
2G066 BA18 BA38 BC07 BC15 CA11

(54)【発明の名称】 光ファイバセンサ

(57)【要約】

【課題】 温度、深度等の準静的な物理量を測定することができる光ファイバセンサを得る。

【解決手段】 周波数変調したレーザ光を送出する光源部2と、測定対象の物理量に応じて、光路となる長さを変化させるセンシング用光ファイバ32を有し、光源部2から送出されたレーザ光をセンシング用光ファイバに透過させて反射したレーザ光を基準のレーザ光と干渉させるセンサ部3と、干渉させたレーザ光を電気信号に変換するO/E変換部4と、電気信号に基づいて干渉させたレーザ光に含まれる高調波成分を抽出する高調波成分抽出部6と、抽出した高調波成分の前記振幅比に基づいて、干渉させた光の位相差及び変調指数Cを算出し、干渉させた光の位相差 ϕ に基づいて許容誤差範囲内であると判断した場合に、変調指数Cに基づいて光路差 ΔL 及び静圧Pを算出する復調部7とを備えている。

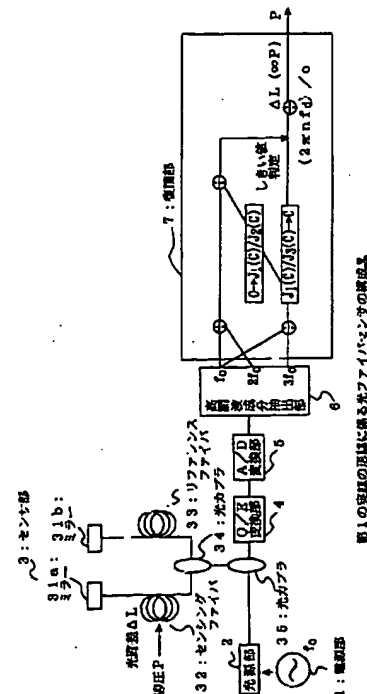


図1の発明の装置に係る光ファイバセンサの構成図

【特許請求の範囲】

【請求項1】 周波数変調したレーザ光を送出する光源部と、

測定対象の物理量に応じて、光路となる長さを変化させるセンシング用光ファイバを有し、前記光源部から送出されたレーザ光を前記センシング用光ファイバに透過させて反射したレーザ光を基準のレーザ光と干渉させるセンサ部と、

前記干渉させたレーザ光を電気信号に変換する光-電気変換部と、

前記電気信号に基づいて前記干渉させたレーザ光に含まれる高調波成分を抽出する高調波成分抽出部と、

抽出した前記高調波成分の前記振幅比に基づいて、前記干渉させた光の位相差及び変調指数を算出し、前記干渉させた光の位相差に基づいて許容誤差範囲内であると判断した場合には、さらに、前記変調指数に基づいて前記光路差及び前記物理量を算出する復調部とを備えたことを特徴とする光ファイバセンサ。

【請求項2】 前記高調波成分抽出部は、2以上の奇数次の高調波成分又は2つ以上の偶数次の高調波成分を抽出し、

前記復調部は、奇数次と偶数次の高調波成分の振幅比に基づいて前記干渉させた光の位相差を算出し、奇数次同士又は偶数次同士の高調波成分の振幅比に基づいて前記変調指数を算出することを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項3】 前記光源部は、パイロット信号となる周波数を含む2つの周波数で周波数変調したレーザ光を送出し、

前記変調部は、前記パイロット信号の1周期分の前記変調指数を蓄積し、蓄積した変調指数の代表値を算出して、その代表値に基づいて前記光路差及び前記物理量を算出することを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項4】 前記代表値の算出は、パイロット信号の周波数に基づく \sin 関数の最小自乗により算出することを特徴とする請求項3記載の光ファイバセンサ。

【請求項5】 請求項1に記載の高調波成分抽出部及び復調部の代わりに、

前記電気信号に基づいて、前記干渉させたレーザ光に含まれる連続する4つの次数の高調波成分を抽出する高調波成分抽出部と、

前記連続する4つの次数の高調波成分の振幅及びベッセル関数の関係式に基づいて変調指数を算出し、前記変調指数に基づいて前記光路差及び前記物理量を算出する復調部を備えたことを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項6】 請求項1に記載の高調波成分抽出部及び復調部の代わりに、

前記電気信号に基づいて、前記干渉させたレーザ光に含

まれる連続する4つの次数の高調波成分を抽出する高調波成分抽出部と、

前記連続する4つの次数の高調波成分、ベッセル関数の関係式、 $\sin^2\phi + \cos^2\phi = 1$ 、前記干渉させたレーザ光の波形により算出した前記レーザ光に基づく定数に基づいて、変調指数に依存する関数を算出し、前記関数に基づいて変調指数を算出し、前記変調指数に基づいて前記光路差及び前記物理量を算出する復調部を備えたことを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項7】 請求項1に記載の高調波成分抽出部及び復調部の代わりに、

前記電気信号に基づいて、前記干渉させたレーザ光に含まれる連続する5つの次数の高調波成分を抽出する高調波成分抽出部と、

前記連続する5つの次数の高調波成分を前4つの連続する次数の高調波成分と後4つの連続する次数の高調波成分とに分け、ベッセル関数の関係式及び $\sin^2\phi + \cos^2\phi = 1$ に基づいて、それぞれの変調指数に依存する関数を算出し、前記関数に基づいて変調指数を算出し、前記変調指数に基づいて前記光路差及び前記物理量を算出する復調部を備えたことを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項8】 前記干渉させたレーザ光の成分を、前記光源部が送出したレーザ光の成分で除してから前記高調波成分抽出部に前記高調波成分を抽出させるようにすることを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項9】 前記干渉させたレーザ光に基づいた擬似信号を作成する擬似信号作成部をさらに備え、

前記干渉させたレーザ光の成分を、前記擬似信号で除してから前記高調波成分抽出部に前記高調波成分を抽出させるようにすることを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項10】 前記光源部は、変調歪みの逆特性分だけ歪ませた周波数変調を施したレーザ光を送出することを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項11】 光路となる長さが一定の光ファイバを有し、前記光源部から送出されたレーザ光を前記光ファイバに透過させて反射したレーザ光を基準のレーザ光と干渉させる基準干渉計部をさらに有し、

前記復調部は、前記センサ部が干渉させたレーザ光及び前記基準干渉計部が干渉させたレーザ光に基づいてそれぞれの変調指数を算出し、変調指数と光路差との比に基づいて光路差を算出し、前記物理量を算出することを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【請求項12】 肩特性に基づいて、光源部が送出したレーザ光の周波数変調を強度変調に変換する波長フィルタ部をさらに備え、

前記復調部は、前記センサ部が干渉させたレーザ光及び前記波長フィルタ部が変換した強度変調の変調振幅に基づいてそれぞれの変調指数を算出し、変調指数と光路差

との比に基づいて光路差を算出し、前記物理量を算出することを特徴とする請求項1記載の光ファイバセンサ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光ファイバにより物理量を測定する光ファイバセンサに関するものである。特に、深度、温度等の準静的な物理量を測定するためのものである。

【0002】

【従来の技術】物理量を測定するためのセンサシステムとして、光ファイバセンサ（以下、光ファイバセンサという）が用いられる。光ファイバセンサは、センサ部分が無電源であるため、電磁誘導に対する信頼性が高く、また、信号は光伝送であるため低損失である。したがって長距離かつ大規模な多点計測が可能であり、ハイドロホン（音響センサ）、地震計（加速度センサ）等に利用されている。

【0003】特開平7-140044号公報には、信号の復調処理としてatan法を用いたシステムが開示されている。atan法によるシステムでは、正弦波状の周波数変調光を干渉型センサ部分に送出し（以下、PGC（Phase Generated Carrier）という）、それにより得られる干渉光の出力から変調周波数の1次及び2次高調波成分を取り出す。そして、それらの振幅比の逆正接（arctangent）から算出した位相差に基づいて物理量を算出するものである。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】このようなatan法をはじめとする従来の光ファイバセンサは、干渉光の出力の瞬時的位相変化を復調処理するものである。そのため、物理量は、交流信号及び直流信号の相対値で表されるものに限定される。そのため、温度、深度等の準静的な物理量の測定を行うには不向きであった。このような準静的な物理量の測定には圧電型センサが用いられるが、圧電型センサでは光ファイバセンサほどの高信頼性、低損失は実現できない。そのため、準静的な物理量を測定する長距離かつ大規模な多点計測等を行えるシステムを構築できなかった。

【0005】そこで、温度、深度等の準静的な物理量を測定することができる光ファイバセンサの実現が望まれていた。

【0006】

【課題を解決するための手段】本発明に係る光ファイバセンサは、周波数変調したレーザ光を送出する光源部と、測定対象の物理量に応じて、光路となる長さを変化させるセンシング用光ファイバを有し、光源部から送出されたレーザ光をセンシング用光ファイバに透過させて反射したレーザ光を基準のレーザ光と干渉させるセンサ部と、干渉させたレーザ光を電気信号に変換する光-電気変換部と、電気信号に基づいて干渉させたレーザ光に

含まれる高調波成分を抽出する高調波成分抽出部と、抽出した高調波成分の振幅比に基づいて、干渉させた光の位相差及び変調指数を算出し、干渉させた光の位相差に基づいて許容誤差範囲内であると判断した場合には、さらに、変調指数に基づいて光路差及び物理量を算出する復調部とを備えている。本発明においては、光源部が送出した周波数変調したレーザ光をセンサ部が干渉させるが、測定対象の物理量に応じて光路の長さが変化することにより、干渉のレーザ光が変化する。光-電気変換部が干渉させたレーザ光を変換した電気信号に基づいて、高調波成分抽出部が高調波成分を抽出する。そして、復調部が高調波成分の振幅比に基づいて、干渉させた光の位相差及び変調指数を算出し、干渉させた光の位相差に基づいて許容誤差範囲内であると判断した場合にのみ光路差及び物理量を算出することにより、精度の高い測定を行う。

【0007】

【発明の実施の形態】実施形態1. 図1は本発明の第1の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図1において、1は電源部である。また、2は光源部である。図1ではレーザダイオードとしている。電源部1及び光源部2により、PGCホモダイン方式の周波数変調（変調周波数 f_0 、最大周波数偏移 f_d ）が施されたレーザ光が送出される。3はセンサ部である。図1ではマイケルソン型の光ファイバ干渉計を用いている。センサ部3は、ミラー31a、31b、センシングファイバ32、リファレンスファイバ33、光カプラ34、35で構成されている。光源部2から送出されたレーザ光が光カプラ35により光カプラ34に透過される。そして、光カプラ34で分岐され、センシングファイバ32及びリファレンスファイバ33を通過する。ここで、センシングファイバ32の長さが物理量（ここでは静圧Pとする）に基づいて変化するため、ミラー31aにより反射される光もそれにより位相が変化する。そのため、ミラー31a、ミラー31bにより反射され、センシングファイバ32及びリファレンスファイバ33を通過して、光カプラ34により再度合成された干渉光も変化する。光カプラ35は、光カプラ34により干渉された干渉光をO/E変換部4に透過する。

【0008】4はO/E変換部である。O/E変換部4は、干渉光の波形（以下、干渉信号という）をアナログ電気信号に変換する。5はアナログ電気信号をデジタル電気信号に変換するA/D変換部である。6は例えばDFT（Discrete Fourier Transform）等の高調波成分抽出部である。高調波成分抽出部6は、デジタル電気信号に基づいて干渉光における変調周波数 f_0 の1次

（ f_0 ）、2次（ $2f_0$ ）及び3次（ $3f_0$ ）の高調波成分を抽出する。7は復調部である。復調部7は抽出した高調波成分により、センシングファイバ32の長さ変化に基づく光路差（直流的な光路差） ΔL を算出する。

【0009】光ファイバセンサにおいては、センシングファイバ32の長さは外部からの圧力に応じて変化する。それが光路差 ΔL となる。したがって、光路差 ΔL が算出できれば外部からの圧力も算出できる。第1の実施の形態では、変調されたレーザ光の変調周波数 f_0 の1次、2次及び3次の高調波成分を抽出する。実際に ΔL を算出する場合は1次及び3次の高調波成分を用いるが、1次及び2次の高調波成分を用いて $\tan \phi$ 又は ϕ を算出する。 $\sin \phi = 0$ (つまり、 $\phi = 0$ 又は $\phi = \pi$) 近傍だと、バイアス誤差が ΔL の値に影響する。そ

$$E(t) = E_0 \cos \{ 2\pi \nu t + (f_d/f_0) \sin 2\pi f_0 t + \phi_0 \} \quad \dots (1)$$

【0011】(1)式は理想状態である。しかし、レーザ光は非線形性の特性を有するため、強度変調を伴うこ

$$E'(t) = E'_0 (1 + \alpha \cos 2\pi f_0 t) \cos \{ 2\pi \nu t + (f_d/f_0) \sin 2\pi f_0 t + \phi_0 \} \quad \dots (2)$$

【0012】光源部2が送出したレーザ光がセンサ部3に入力し、それに基づく干渉光がO/E変換部4に入力される。ここで、準静的な物理量を表す静圧Pに対して変化するセンシングファイバ32の光路差を ΔL とすると、干渉信号は次式(3)で与えられる。ここで、 $C =$

$$I'(t) = (1 + \alpha \cos 2\pi f_0 t)^2 \times \{ A + B \cos (C \cos 2\pi f_0 t + \phi) \} \quad \dots (3)$$

【0013】(3)式を周波数分析すると、変調周波数の n 次高調波成分 I_n は次式(4)で与えられる。こ

$$\begin{aligned} |I_{2n-1}| &= B [J_{2n-1}(C) \sin \phi + \alpha \{ J_{2n}(C) - J_{2n-2}(C) \} \cos \phi] \\ |I_{2n}| &= B [J_{2n}(C) \cos \phi + \alpha \{ J_{2n+1}(C) - J_{2n-1}(C) \} \sin \phi] \quad \dots (4) \end{aligned}$$

【0014】(4)式から考えると、高調波成分抽出部6から抽出される1次、2次及び3次高調波成分は次式

$$\begin{aligned} I_1 &= B [J_1(C) \sin \phi + \alpha \{ J_2(C) - J_0(C) \} \cos \phi] \\ I_2 &= B [J_2(C) \cos \phi + \alpha \{ J_3(C) - J_1(C) \} \sin \phi] \\ I_3 &= B [J_3(C) \sin \phi + \alpha \{ J_4(C) - J_2(C) \} \cos \phi] \quad \dots (5) \end{aligned}$$

【0015】復調部7は(5)式で算出された値に基づいて光路差 ΔL を算出する。まず、1次高調波成分と3次高調波成分との振幅比を X_{13} とすると、 X_{13} は次式(6)で与えられる。 X_{13} は C に依存する関数となるた

$$\begin{aligned} X_{13} &= |I_1| / |I_3| \\ &= |B J_1(C) \sin \phi / B J_3(C) \sin \phi| \\ &= |J_1(C) / J_3(C)| \quad \dots (6) \end{aligned}$$

【0016】実際にはここに強度変調 α が加わることになる。その場合には、次式(7)のようになる。こ

$$X_{13} = J_1(C) / J_3(C) [1 + \{ J'(C) / J_1(C) - J''(C) / J_3(C) \} \alpha \cot \phi] \quad \dots (7)$$

【0017】(7)式から考えると、フェージング時($\sin \phi = 0$)には、発散するバイアス誤差が加算されてしまう。そのため、特に ϕ が $\phi = 0$ 又は $\phi = \pi$ の近傍の値では干渉信号が劣化し、SNR(S/N比)が低

こで、 $\sin \phi = 1$ (つまり、 $\phi = \pm \pi/2$) 近傍のあらかじめ定めた範囲内にあるかどうかを判断し、その範囲内にあれば ΔL を出力し、測定の精度を高める。

【0010】次に ΔL 算出までの処理について説明する。電源部1が変調周波数 f_0 、最大周波数偏移 f_d で周波数変調を行った電圧を印加する(以下、変調信号を送信するという)場合、光源部2から送出されるレーザ光の電界ベクトルは次式(1)で与えられる。ここで ϕ_0 は初期位相項である。

となり、実際には次式(2)のようになる。ここで α は強度変調率を表す値である。

$2\pi f_d n \Delta L / c$ (c :真空中の光速、 n :ファイバコアの実効屈折率)である。この C を変調指数とする。また、 ϕ は干渉計のドリフト位相差、 A 及び B はレーザ光の振幅等に依存する定数である。

で $J_n(C)$ は n 次ベッセル関数である。

め、(6)式の逆関数に相当する変換関数又は変換テーブルをあらかじめ用意し、参照できるようにしておけば変調指数 C を算出することができる。

で、 $J'(C) = J_2(C) - J_0(C)$ 、 $J''(C) = J_4(C) - J_2(C)$ である。

くなるので測定誤差が大きくなる。そこで、SNRの高い $\pm \pi/2$ 近傍のある範囲内の ϕ により算出した ΔL を最終的に出力するようにする。そのために ϕ の値の推定を行う。

【0018】そこで、1次高調波成分と2次高調波成分との振幅比 X_{12} を算出する。 X_{12} は次式(8)で与えられる。

$$\begin{aligned} X_{12} &= |I_1| / |I_2| \\ &= |BJ_1(C) \sin \phi / BJ_2(C) \cos \phi| \\ &= | \{J_1(C) / J_2(C)\} \tan \phi | \end{aligned} \quad \dots (8)$$

【0019】(7)式から算出した変調指数Cに基づいて $J_1(C) / J_2(C)$ を算出する。 X_{12} の値を $J_1(C) / J_2(C)$ で除することにより、 $\tan \phi$ (又は \arctan 法等により ϕ)の値を算出し、前述した範囲内の値であるかどうかを判断する。そして、範囲内の値であると判断すると、その値に基づいて算出した光路差 ΔL に基づいて静圧Pを算出し、出力する。

【0020】以上のように第1の実施の形態によれば、変調部7において、1次及び3次の高調波成分の振幅比を用いて算出した変調指数Cに比例する光路差 ΔL を算出するようにしたので、光ファイバセンサでも準静的な物理量を測定することができる。また、1次及び2次の高調波成分を用いて $\tan \phi$ 又は ϕ を算出し、その値に基づいて光路差 ΔL を算出するかどうかを判断するようにしたので、高いSNRにより算出した ΔL だけを算出することができ、静圧Pの測定精度を高めることができ

$$\begin{aligned} E_p(t) &= E_0 \cos \{2\pi \nu t + (f_d/f_0) \sin 2\pi f_0 t \\ &\quad + (f_{p-d}/f_{p-0}) \sin 2\pi f_{p-0} t + \phi_{01}\} \end{aligned} \quad \dots (9)$$

【0022】また、高調波成分抽出部6Aは、デジタル電気信号に基づいて干渉光の1次及び3次の高調波成分だけを抽出する点で高調波成分抽出部6とは異なる。7Aは復調部7Aは光路差 ΔL の算出方法が復調部7とは異なる。

【0023】第2の実施の形態においては、電源部1Aが2重にFM変調し、送信した変調信号に基づくレーザ光により、センシングを行い、精度が高い光路差 ΔL を

$$I(t) = A + B \cos(C \cos 2\pi f_0 t + D \cos 2\pi f_{p-0} t + \phi) \quad \dots (10)$$

【0025】高調波成分抽出部6Aは、デジタル電気信号に基づいて干渉光の1次及び3次の高調波成分を抽出

$$\begin{aligned} I_1 &= BJ_1(C) \sin(D \cos 2\pi f_{p-0} t + \phi) \\ I_3 &= BJ_3(C) \sin(D \cos 2\pi f_{p-0} t + \phi) \end{aligned} \quad \dots (11)$$

【0026】復調部7Aは、第1の実施の形態と同様に(6)式に基づいて1次高調波成分と3次高調波成分との振幅比 X_{13} を算出し、その X_{13} に基づいて変調指数Cを算出する。ただ、実際には、レーザの発振波長特性の $\lambda = \gamma_0 + \gamma_1 V + \gamma_2 V^2$

【0027】その場合の最大周波数偏移 f_d は次式(1)

$$f_d = c \Delta \lambda / \lambda^2 \propto \Delta \lambda$$

【0028】(12)式及び(13)式から次式(1)

$$f_d \propto \gamma_1 \Delta V (1 + 2\gamma_2 / \gamma_1 V) \quad \dots (14)$$

【0029】2重FM変調を行った場合、パイロット信号となるように施す周波数変調により、Vが \sin 関数

$$f_d' = f_d (1 + \beta \sin 2\pi f_{p-0} t) \quad \dots (15)$$

【0030】前述したように、変調指数Cは $C = 2\pi f$

る。
【0021】実施形態2. 図2は本発明の第2の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図2において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。1Aは電源部である。電源部1Aは、第1の実施の形態で行った周波数変調に加え、さらにパイロット信号となるような低周波による周波数変調を行ったレーザ光が光源部2から送出されるような変調信号を送信する。つまり、2重にFM変調を行う。その場合の電界ベクトルを $E_p(t)$ とすると、電界ベクトル $E_p(t)$ は次式(9)で与えられる。ここで、変調周波数 f_{p-0} 、最大周波数偏移 f_{p-d} されたレーザ光が送出される。また、 ϕ_{01} は初期位相項である。ここで、これ以後第5の実施の形態までは、強度変調は無視できるもの($\alpha=0$)として説明を行う。

算出する。

【0024】次に光路差 ΔL 算出までの処理について説明する。(9)式のような周波数変調に基づいて光源部2がレーザ光を送出する。そのレーザ光がセンサ部3を通して生じた干渉信号は次式(10)で表される。ここでDはパイロット信号に係るCと同様の変調指数である。

する。1次及び3次高調波成分は次式(5)で与えられる。

非線形性を受け、最大周波数偏移 f_d もパイロット信号と同じ周期($1/f_{p-0}$)で変調を受ける。ここで、変調電圧(変調信号)Vとレーザ発振波長 λ の特性の関係を次式(12)で仮定する。

$$\lambda = \gamma_0 + \gamma_1 V + \gamma_2 V^2 \quad \dots (12)$$

3)で定義される。

$$f_d = c \Delta \lambda / \lambda^2 \propto \Delta \lambda \quad \dots (13)$$

4)が導かれる。

$$f_d \propto \gamma_1 \Delta V (1 + 2\gamma_2 / \gamma_1 V) \quad \dots (14)$$

で変化するので、最大周波数偏移 f_d が受ける変調は、次式(15)で表されることになる。

$$f_d' = f_d (1 + \beta \sin 2\pi f_{p-0} t) \quad \dots (15)$$

$\Delta n \Delta L / c$ で与えられるので、(15)式から考える

と、 C も、 $C' = C(1 + \beta \sin 2\pi f_{p-0} t)$ という変調を受ける。そこで、振幅比 X_{13} に基づいて導き出した変調指数 C' をパイロット信号の1周期分蓄積する。そして、例えばパイロット信号周期($1/f_{p-0}$)の \sin 関数である $y = a_1 \sin 2\pi f_{p-0} t + a_2$ 等のような関数で最小二乗フィットし、フィット関数のベースラインである a_2 を代表値として、これを変調指数 C とする。この C に基づいて光路差 ΔL を算出する。そして、光路差 ΔL に基づいて静圧 P を算出し、出力する。

【0031】以上のように第2の実施の形態によれば、電源部1Aから2重にFM変調した変調信号に基づくレーザ光により、センシングを行うようにしたので、精度が高い光路差 ΔL を算出することができる。

【0032】実施形態3. 図3は本発明の第3の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図3において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図3において、6Bは高調波成分抽出部であ

$$\begin{aligned} I_1 &= B J_1(C) \sin \phi \\ I_2 &= B J_2(C) \cos \phi \\ I_3 &= B J_3(C) \sin \phi \\ I_4 &= B J_4(C) \cos \phi \end{aligned} \quad \dots (16)$$

【0035】ここで、ベッセル関数の関係式は次式(17)で与えられる。

$$\{J_{n-1}(x) + J_{n+1}(x)\} = (2n/x) J_n(x) \quad \dots (17)$$

【0036】したがって、これを I_1 、 I_2 、 I_3 及び I_4 を用いて表すと次式(18)のようになる。

$$\begin{aligned} I_1 + I_3 &= \{4B J_2(C) \sin \phi\} / C \\ I_2 + I_4 &= \{6B J_3(C) \cos \phi\} / C \end{aligned} \quad \dots (18)$$

【0037】(18)式から変調指数 C を算出できるように、次式(19)に I_1 、 I_2 、 I_3 及び I_4 を代入する。そして、算出した変調指数 C に基づいて光路差 ΔL を算出する。そして、光路差 ΔL に基づいて静圧 P を算出し、出力する。

$$C = [24(I_2 I_3) / (I_1 + I_3) / (I_2 + I_4)]^{1/2} \quad \dots (19)$$

【0038】以上のように第3の実施の形態によれば、高調波成分抽出部6Bにおいて1次、2次、3次及び4次高調波成分を抽出しておき、変調部7Bにおいて、(17)式で与えられるベッセル関数の関係式に基づいて、変調指数 C を直接算出するようにしたので、ベッセル関数の逆変換を行わなくても変調指数 C を算出することができ、計算量を抑えることができる。

【0039】実施形態4. 図4は本発明の第4の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図4において、図3と同じ図番を付しているものは、第1及び第3の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図4において、復調部7Cは、 ϕ の影響を除いた上で、干渉光信号 I の波形の最大値及び最小値に基づいて B の値を算出して変調指数 C 、光路差 ΔL を算出するという点で復調部7Cとは異なる。

$$I_3(I_1 + I_3) / 4 + I_2(I_2 + I_4) / 6 = B^2 J_2(C) J_3(C) / C \quad \dots (20)$$

【0043】(3)式から考えると、干渉信号 I の波形

る。高調波成分抽出部6Bは、デジタル電気信号に基づいて干渉光の1次、2次、3次及び4次の高調波成分を抽出する点で高調波成分抽出部6とは異なる。7Bは復調部である。干渉光の1次、2次、3次及び4次の高調波成分に基づいて、変換関数又は変換テーブルを用いることなく変換指数 C を直接算出できる方法を採用する点で変調部7とは異なる。

【0033】第3の実施の形態では、逆関数算出による計算量の増加を防ぐために、ベッセル関数の関係式を用い、変換関数又は変換テーブルを用いることなく変換指数 C を直接算出する。

【0034】次に光路差 ΔL 算出までの処理について説明する。レーザ光を送出し、センシングによる干渉光をデジタル信号に変換するまでの動作は第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。高調波成分抽出部6Bは1次、2次、3次及び4次高調波成分を抽出する。これらは(4)式に基づけば次式(16)で表される。

【0040】第4の実施の形態においては、ベッセル関数の関係式に基づいて信号劣化の原因である ϕ の影響を除いた上で変調指数 C を算出することにより、精度の高い光路差 ΔL を算出する。

【0041】次に光路差 ΔL 算出までの処理について説明する。レーザ光を送出し、センシングによる干渉光の1次、2次、3次及び4次高調波成分を抽出するまでの動作は第1及び第3の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。

【0042】復調部7Cは、(16)式の I_1 、 I_2 、 I_3 及び I_4 により、(17)式に基づいて $I_1 + I_3$ 及び $I_2 + I_4$ を算出する。そして、次式(20)に代入する。このとき、 $\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$ であるから、 $\sin \phi$ 及び $\cos \phi$ を消去することができる。

の最大値は $A+B$ となり、最小値は $A-B$ となる。そこ

で、Bは(最大値-最小値)/2で算出できる。算出したBの値を(20)式に代入すると、変調指数Cだけの関数となる。そこで、前述した変換関数又は変換テーブルに基づいて変調指数Cを算出する。このCに基づいて光路差 ΔL を算出する。そして、光路差 ΔL に基づいて静圧Pを算出し、出力する。

【0044】以上のように第4の実施の形態によれば、復調部7Cにおいて、ベッセル関数の関係式に基づいて $I_1 + I_3$ 及び $I_2 + I_4$ を算出し、(20)式に基づいて ϕ を除き、干渉信号Iの波形に基づいてBを除いて変調指数Cだけの関数とした上で、変換関数又は変換テーブルを用いて変調指数Cを算出し、光路差 ΔL を算出するようにしたので、信号劣化の原因である ϕ の影響を除いた光路差 ΔL が算出されることになり、精度の高い光路差 ΔL を出力することができる。

【0045】実施形態5、図5は本発明の第5の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図5において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省

$$\begin{aligned} I_1 &= B J_1(C) \sin \phi \\ I_2 &= B J_2(C) \cos \phi \\ I_3 &= B J_3(C) \sin \phi \\ I_4 &= B J_4(C) \cos \phi \\ I_5 &= B J_5(C) \sin \phi \end{aligned} \quad \dots (21)$$

【0049】復調部7Dは、(21)式の I_1 、 I_2 、 I_3 及び I_4 により、(17)式に基づいて $I_1 + I_3$ 及び $I_2 + I_4$ を算出する。そして、(20)式に代入す

$$I_3(I_3 + I_5) / 8 + I_2(I_2 + I_4) / 6 = B^2 J_3(C) J_4(C) / C \quad \dots (22)$$

【0050】(20)式及び(22)式の比を算出することで、 B^2 は消去され、残るのは $J_2(C) / J_4(C)$ となるが、これは2次高調波成分と4次高調波成分との振幅比 X_{24} である。(6)式と同様に考えれば、 X_{24} はCに依存する関数となるため、変換関数又は変換テーブルに基づき変調指数Cを算出することができる。このCに基づいて光路差 ΔL を算出する。そして、光路差 ΔL に基づいて静圧Pを算出し、出力する。

【0051】以上のように第5の実施の形態によれば、ベッセル関数の関係式に基づいて $I_1 + I_3$ 及び $I_2 + I_4$ を算出して(20)式に基づいて ϕ を除き、また $I_3 + I_5$ 及び $I_2 + I_4$ を算出して(22)式に基づいて ϕ を除き、それらの比を算出することで、Bを除いて変調指数Cだけの関数とした上で、変換関数又は変換テーブルを用いて変調指数Cを算出し、光路差 ΔL を算出するようにしたので、信号劣化の原因である ϕ の影響を除いた光路差 ΔL が算出されることになり、精度の高い光路差 ΔL を出力することができる。

【0052】実施形態6、図6は本発明の第6の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図6において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施

略する。図5において、高調波成分抽出部6Cは、デジタル電気信号に基づいて干渉光の1次、2次、3次、4次及び5次の高調波成分を抽出する点で高調波成分抽出部6及び高調波成分抽出部6Aとは異なる。復調部7Dは、干渉光の1次～4次の高調波成分及び2次～4次の高調波成分に基づいて変調指数Cを算出する点で変調部7Cとは異なる。

【0046】第5の実施の形態においては、ベッセル関数の関係式に基づいたパラメータを算出し、信号劣化の原因である ϕ の影響を除いた上で変調指数Cを算出することにより、精度の高い光路差 ΔL を算出する。

【0047】次に光路差 ΔL 算出までの処理について説明する。レーザ光を送出し、センシングによる干渉信号をデジタル信号に変換するまでの動作は第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。

【0048】高調波成分抽出部6Cは1次、2次、3次、4次及び5次高調波成分を抽出する。これらは(4)式に基づいて次式(21)のようになる。

る。同様に、(21)式の I_2 、 I_3 、 I_4 及び I_5 により、(17)式に基づいて $I_3 + I_5$ 及び $I_2 + I_4$ を算出する。そして、次式(22)式に代入する。

の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図6において、O/E変換部4AはO/E変換部4と同じものである。また、A/D変換部5AはA/D変換部5と同じものである。8は強度変調信号除去部である。強度変調信号除去部8は、理想的な干渉信号が得られるように、強度変調信号が含まれた干渉信号から強度変調信号である送出光を除くものである。9は光分配器となる光カプラである。

【0053】前述したように、光源部2から送出されるレーザ光は強度変調を伴う(ここでは、強度変調信号を含むという表現とする)。これをそのまま高調波成分抽出部6で高調波成分を抽出すると、(5)式に表されているように誤差成分が含まれる。これは、(7)式のように振幅比 X_{13} の誤差として表れる。これは、たとえ $\pm \pi / 2$ 近傍であったとしても、次式(23)のようになり、変調指数C、ひいては光路差 ΔL は ϕ に依存してしまう。そこで、第6の実施の形態では、干渉信号から強度変調信号を除去するようにし、 ϕ の影響を抑えてから高調波成分抽出部6で高調波成分を抽出するようにし、精度の高い光路差 ΔL を得るようにする。

$$X_{13} = J_1(C) / J_3(C) [1 + \{J'(C) / J_1(C) - J''(C) / J_3(C)\} \alpha \cdot (\pm \pi / 2 - \phi)] \dots (23)$$

【0054】光源部2から送出されるレーザ光は(2)式で与えられる。これをO/E変換部4Aで変換した場

$$\langle |E'|^2 \rangle = (|E'_0|^2 / 2) (1 + \alpha \cos 2\pi f_0 t)^2 \dots (24)$$

【0055】一方、強度変調信号を含む干渉信号は、前述した(3)式で与えられる。強度変調信号除去部8は(3)式の干渉信号を(24)式で除する。すると、次式(25)のような理想の干渉信号を得ることができ

$$I = A + B \cos(C \cos 2\pi f_0 t + \phi) \dots (25)$$

【0056】以上のように第5の実施の形態によれば、変調信号除去部8において、強度変調信号を含む干渉信号を送出信号で除することで、干渉信号から強度変調信号を除去するようにし、 ϕ の影響を抑えてから高調波成分抽出部6で高調波成分を抽出するようにしたので、精度の高い光路差 ΔL を算出することができる。

【0057】実施形態7. 図7は本発明の第7の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図7において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図7において、A/D変換部5Bは、電源部1Bの変調信号に含まれるトリガー信号(同期信号)を受信し、同期信号に基づいて同期し、強度変調信号除去部8に強度変調信号を含む干渉信号を送信する。10は擬似信号作成部である。あらかじめ電源部1が送出する信号を測定しておき、同様に変調した送出光擬似信号を強度変調信号除去部8に送信する。

【0058】第7の実施の形態は、第6の実施の形態と同様に、あらかじめ強度変調信号を除去した干渉信号に基づいて高調波成分を抽出し、精度の高い光路差 ΔL を得るようにするものである。第6の実施の形態と異なる点は、例えば、別の処理装置のような擬似信号作成部1

$$V(t) = V_{\text{offset}} + V_{\text{amp}} \sin 2\pi f_0 t \dots (26)$$

【0062】しかし、実際には、レーザが非線形性を有する特性であるため、送出される電界ベクトルには、次

$$E(t) = E_0 \cos[2\pi \nu t + (f_d/f_0) \{\sin 2\pi f_0 t + \beta \sin(4\pi f_0 t + \theta) + \phi_0\}] \dots (27)$$

【0063】したがって、干渉信号は次式(28)で表

$$I(t) = A + B \cos\{C \cos 2\pi f_0 t + \beta C \sin(4\pi f_0 t + \theta) + \phi\} \dots (28)$$

【0064】このときに1次高調波成分と3次高調波成分の振幅比 X_{13} は次式(29)のようになる。ここで、

$$X_{13} = J_1(C) / J_3(C) [1 + \{J'(C) / J_1(C) - J''(C) / J_3(C)\} \beta C \cot \phi] \dots (29)$$

【0065】このような場合、(28)式から考えると、1次信号成分のサイドバンドが3次成分に重なってしまうことになり、SNRが劣化する。そこで、本実施

$$V(t) = V_{\text{offset}} + V_{\text{amp}} \{\sin 2\pi f_0 t - \beta (\sin 4\pi f_0 t + \theta)\} \dots (30)$$

【0066】以上のように、第8の実施の形態によれば、

合、その信号(以下、送出信号という)は次式(24)で与えられる。

る。この干渉信号に基づいて、高調波成分抽出部6において高調波成分を抽出し、復調部7で光路差 ΔL を算出し、また、静圧Pを算出し、出力する。

0により、(24)式と同様の強度変調信号をデジタル化した送出光擬似信号を作成しておき、強度変調信号除去部8で除算を行い、理想の干渉信号を得る。

【0059】以上のように、第7の実施の形態によれば、擬似信号作成部10であらかじめ送出光擬似信号を作成しておき、変調信号除去部8において、強度変調信号を含む干渉信号を送出光擬似信号で除することで、干渉信号から強度変調信号を除去するようにし、 ϕ の影響を抑えてから高調波成分抽出部6で高調波成分を抽出するようにしたので、精度の高い光路差 ΔL を算出することができる。

【0060】実施形態8. 図8は本発明の第8の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図8において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図8において、電源部1Cは、あらかじめ強度変調による歪み分を補正したレーザ光を光源部2から送出させるようにした点で電源部1とは異なる。

【0061】PGCホモダイン方式では、次式(26)で表される変調信号を加えることにより、光源部2から(1)式に示すようなレーザ光が送出される。

式(27)のように、2次歪み振幅係数 β 及び位相係数 θ で与えられる2次成分が加わることになる。

される。

$J'(C) = J_3(C) - J_1(C)$ 、 $J''(C) = J_1(C) + J_5(C)$ である。

の形態の電源部1Cでは、純粋な正弦波変調ではなく、この歪み成分の逆特性となる次式(30)式を変調信号として光源部2に送信する。

ば、電源部1Cが送信する変調信号でもあらかじめ2次

成分の補正を行っておくことにより、 ϕ の影響を抑えることができ、精度の高い光路差 ΔL を算出し、静圧 P を出力することができる。

【0067】実施形態9. 図9は本発明の第9の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図9において、以前に説明した図と同じ図番を付しているものは、上述の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図9において、11は光路差 ΔL_0 が一定の標準干渉計である。標準干渉計11による干渉信号に基づいて算出した変調指数を C_0 とする。ま

$$C(t) = 2\pi f_d(t) n \Delta L / c \quad \dots (31)$$

【0069】一方、同様に考えると、変調指数 C_0 と光

$$C_0(t) = 2\pi f_d(t) n \Delta L_0 / c \quad \dots (32)$$

【0070】そこで、両者の比を算出する。比を算出することにより、 $f_d(t)$ を消去することができる。 $C(t)$ 、 $C_0(t)$ の値は算出され、 ΔL_0 の値は既

$$\begin{aligned} C(t) / C_0(t) &= \Delta L / \Delta L_0 \\ \Delta L &= \Delta L_0 \{ C(t) / C_0(t) \} \end{aligned} \quad \dots (33)$$

【0071】以上のように第9の実施の形態においては、光路差 ΔL_0 が一定である標準干渉計11により算出した変調指数 C_0 とセンサ部3を通過した干渉信号に基づいて算出した変調指数 C とに基づいて光路差 ΔL を(33)式に基づいて算出するようにしたので、最大周波数偏移 f_d の長期的な時間での変動に基づく測定誤差を抑えることができる。

【0072】実施形態10. 図10は本発明の第10の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。図10において、図1と同じ図番を付しているものは、第1の実施の形態で説明したことと同様の動作を行うので説明を省略する。図10において、12は波長フィルタ部である。波長フィルタ部12は、肩特性を利用して送出したレーザ光の周波数変調を強度変調に変換する。復調部7Fはその変調振幅を算出処理を行う点で、復調部7Eとは異なる。

【0073】この振幅は、第9の実施の形態で説明した最大周波数偏移 $f_d(t)$ に比例するものである。したがって、干渉信号に基づいて算出した変調指数 C を変調振幅で除することにより最大周波数偏移 $f_d(t)$ の長期的な時間での変動による影響を除去し、精度の高い光路差 ΔL を出力する。ここで肩とは、スペクトルのピークのフラットな所ではなく、ピークからずれた傾きのある部分のことである。この領域を利用することにより、波長変化を強度変化に変換することができる。

【0074】以上のように第10の実施の形態によれば、第9の実施の形態のように標準干渉計11を用いなくても最大周波数偏移 $f_d(t)$ の長期的な時間での変動による誤差(影響)を除去できるような光ファイバセンサを得ることができる。そのため、標準干渉計11を設けるスペース等が少なくすむ。

【0075】実施形態11. 上述の実施の形態では、マ

た、変調部7Eは、変調指数 C 及び C_0 を算出する2系統の復調処理部を有している。この復調処理部は、第1の実施の形態で説明したものと同様であるので説明を省略する。そして、算出した変調指数 C 、 C_0 及び既知の値である光路差 ΔL_0 に基づいて、光路差 ΔL を出力する。

【0068】準静的な物理量の測定においては、最大周波数偏移 f_d の長期的な時間での変動(ドリフト)が測定誤差となる。この最大周波数偏移 f_d の時間的変動を次式(31)のように表す。

$$\dots (31)$$

路差 ΔL_0 との関係は次式(32)で表される。

$$\dots (32)$$

知であるので、 ΔL は次式(33)で表されることになる。

$$\dots (33)$$

イケルソン型の光ファイバ干渉計を用いて説明したが、これに限定されるものではなく、例えばマッハツェンダ型干渉計等の2ビーム干渉計でもよい。また、光ファイバ干渉計でなく、バルク型干渉計でもよい。

【0076】実施形態12. 上述の実施の形態では第1次高調波成分及び第3次高調波成分に基づいて変調指数 C を算出し、第1次高調波成分及び第3次高調波成分に基づいて ϕ を算出するようにしたが、これに限定されるものではない。変調指数については、奇数次(偶数次)の高調波成分同士の振幅比に基づいて算出すればよい。また、 ϕ については、奇数次と偶数次との高調波成分の振幅比に基づいて算出すればよい(ただし、高次のベッセル関数を用いると感度、ダイナミックレンジ等は劣化する)。

【0077】実施形態13. 上述の実施の形態では、A/D変換部5及び高周波成分抽出部6を用いて周波数分析を行うことで説明したが、これを従来のatan法のような同期検波によるアナログ処理にしてもよい。

【0078】実施形態14. 上述の実施の形態では、直流信号を計測するためのセンサ単体で説明したが、多数のセンサを時分割等で多重化した分布状計測でも行うことができる。

【0079】実施形態15. 上述の第1の実施の形態では、1次高調波成分と2次高調波成分を用いて振幅比を用いて $\tan \phi$ を算出し、 ϕ の範囲を推測するようにしているが、 $\tan \phi$ でなくても ϕ の範囲を推測できるものであればよい。

【0080】実施形態16. 第2の実施の形態において、フィット関数を、例えばsin関数である $y = a_1 \sin 2\pi f_{p-0} t + a_2$ としたが、本発明はこれに限定されるものではなく、他の関数を用いてもよい。

【0081】実施形態17. 上述の第4の実施の形態で

は、干渉出力の波形の最大値及び最小値に基づいてBの値を算出したが、これに限定されるものではなく、別の方法を用いてもよい。また、AGC (Automatic Gain Control) を用いることで、Bの値を一定に保持するようにしてもよい。

【0082】実施形態18. 上述の第6の実施の形態から第10の実施の形態は、レーザ光の変動や非線形効果を補償し、精度を高めるものであるので、このような光ファイバセンサだけでなく、従来の光ファイバセンサ等にも適用できる。

【0083】

【発明の効果】以上のように本発明によれば、高調波成分抽出部が干渉させたレーザ光から抽出した高調波成分に基づいて、復調部がその振幅比を算出し、干渉させた光の位相差及び変調指数を算出し、干渉させた光の位相差に基づいて許容誤差範囲内であると判断した場合にのみ光路差及び物理量を算出するようにしたので、高いSNRにより算出することができ、測定精度を高めることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図2】本発明の第2の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図3】本発明の第3の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図4】本発明の第4の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図5】本発明の第5の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図6】本発明の第6の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図7】本発明の第7の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図8】本発明の第8の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

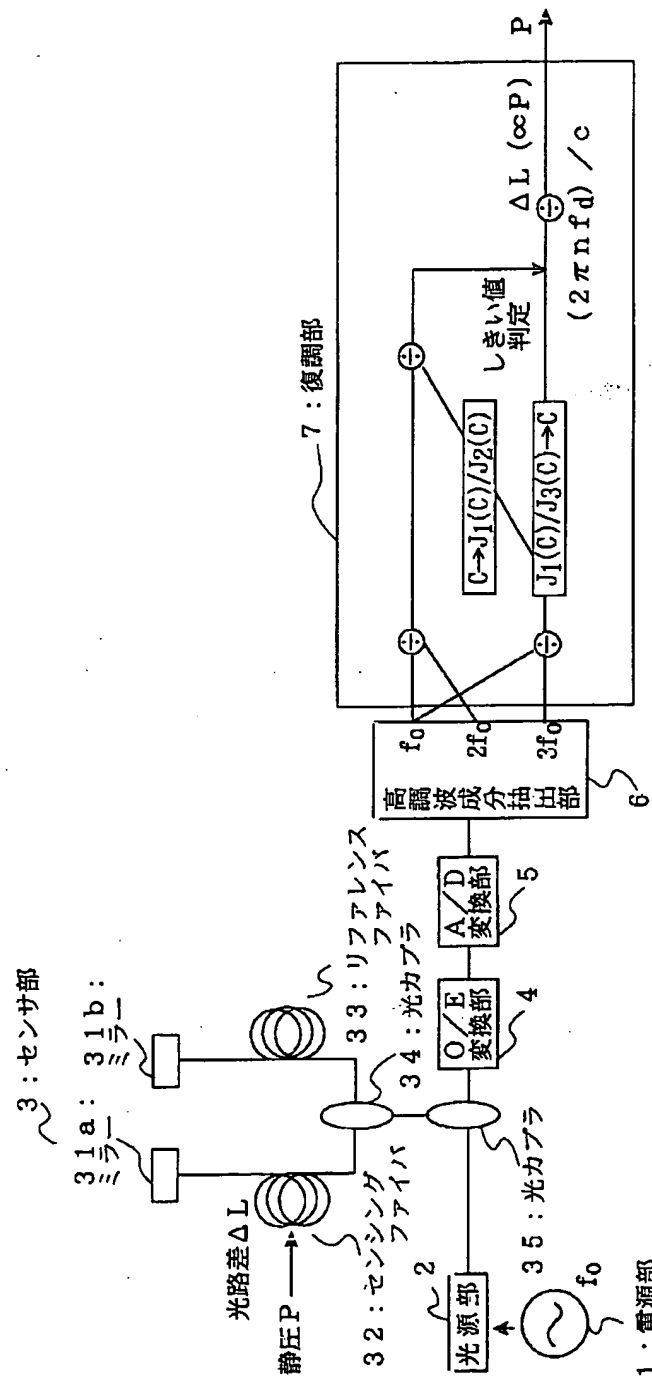
【図9】本発明の第9の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【図10】本発明の第10の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図である。

【符号の説明】

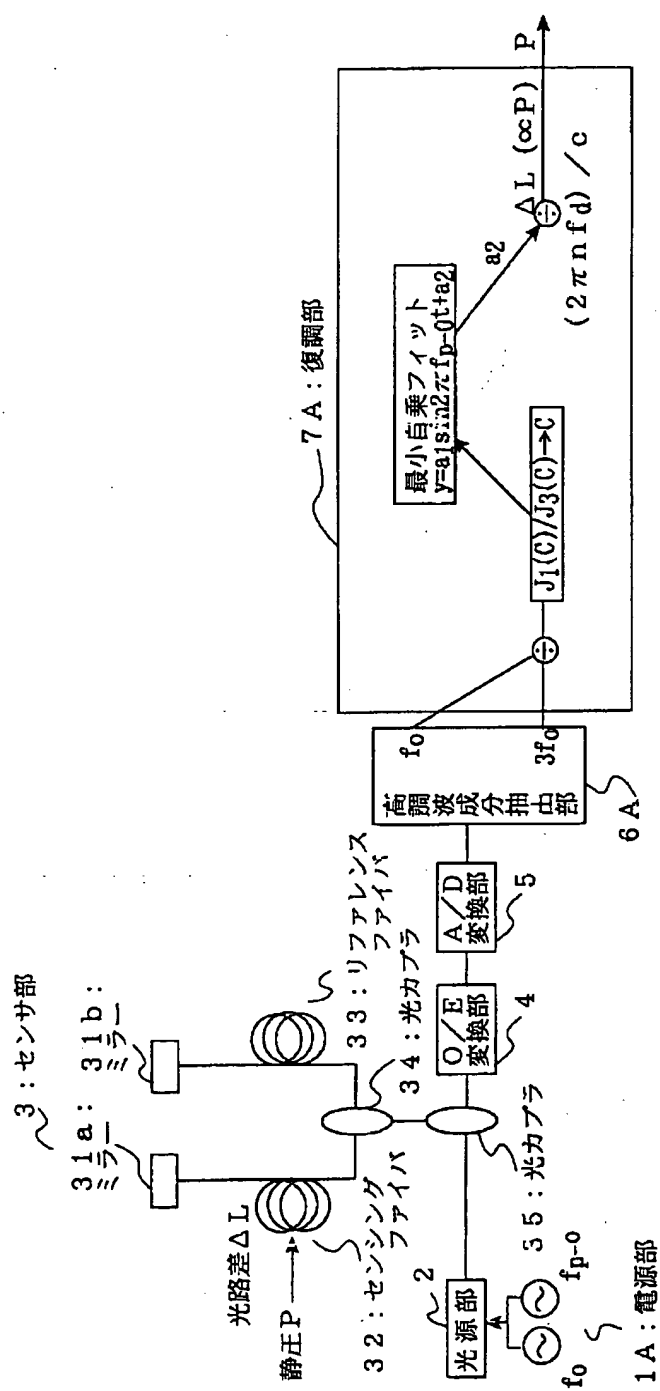
- 1、1A、1B、1C 電源部
- 2 光源部
- 3 センサ部
- 31a、31b ミラー
- 32 センシングファイバ
- 33 リファレンスファイバ
- 34、35、9 光カプラ
- 4、4A O/E変換部
- 5、5A、5B A/D変換部
- 6、6A、6B、6C 高調波成分抽出部
- 7、7A、7B、7C、7D、7E、7F 復調部
- 8 強度変調信号除去部
- 10 擬似信号作成部
- 11 標準干渉計
- 12 波長フィルタ部

【図1】



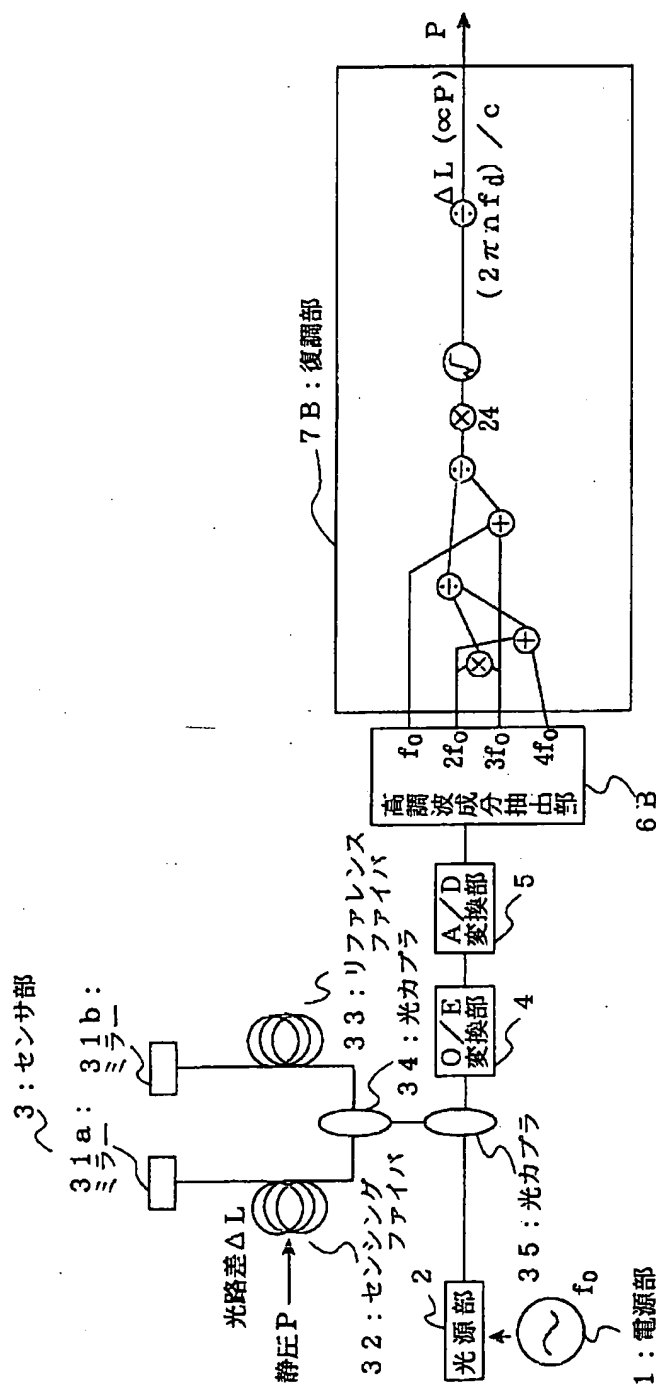
第1の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図2】



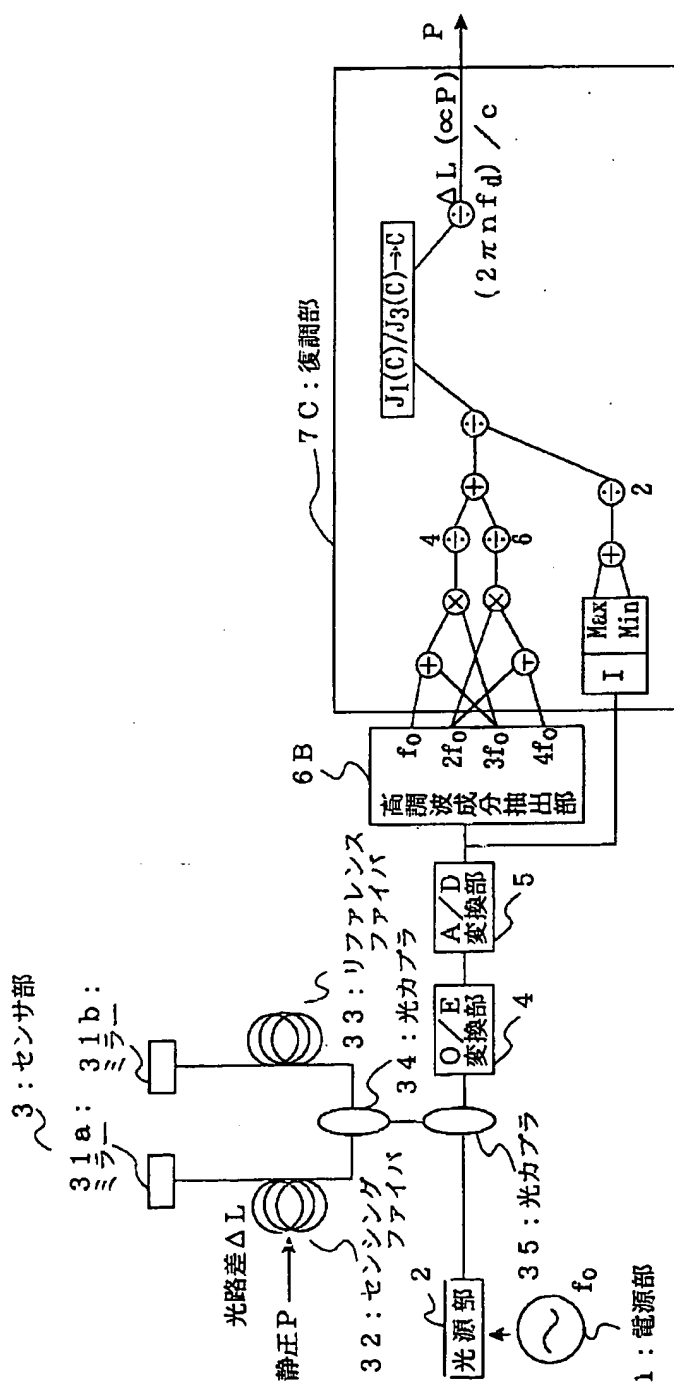
第2の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図 3】



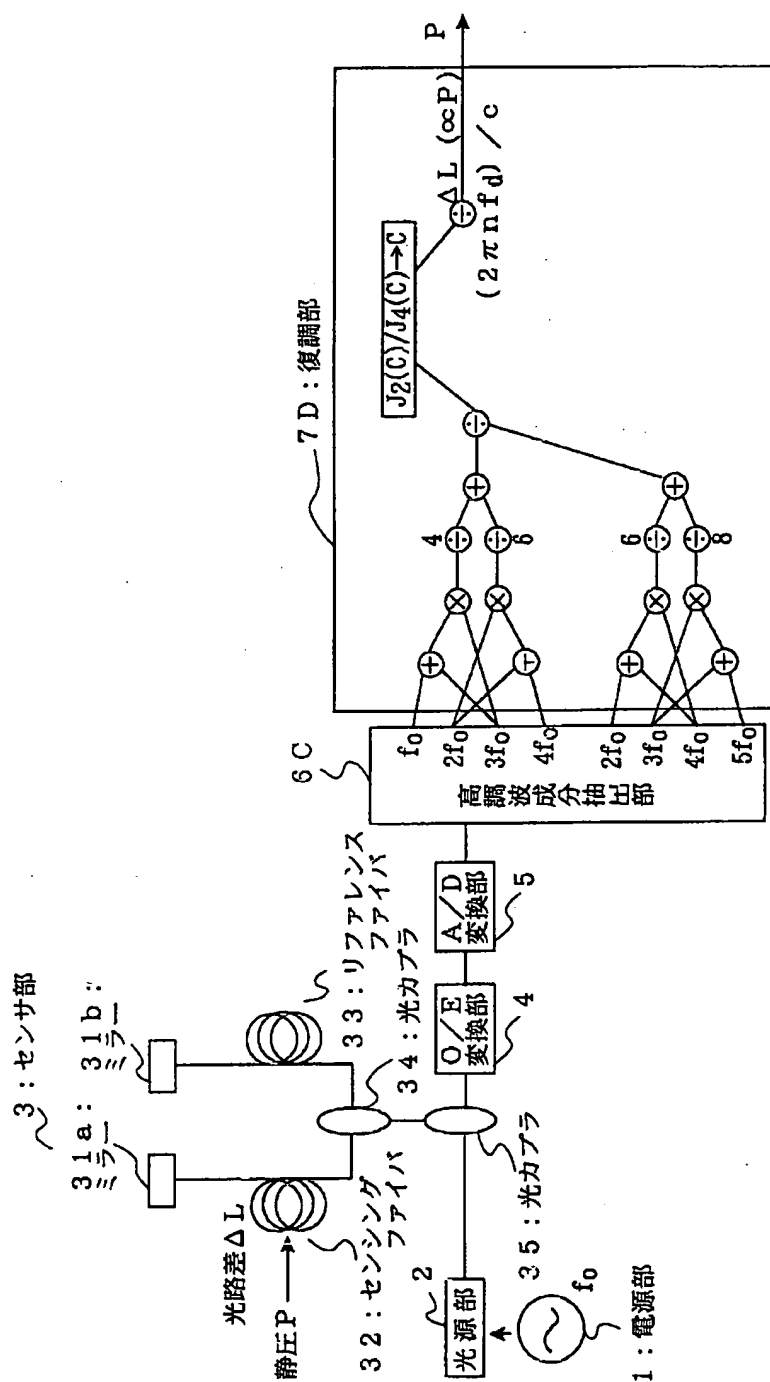
第3の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図4】



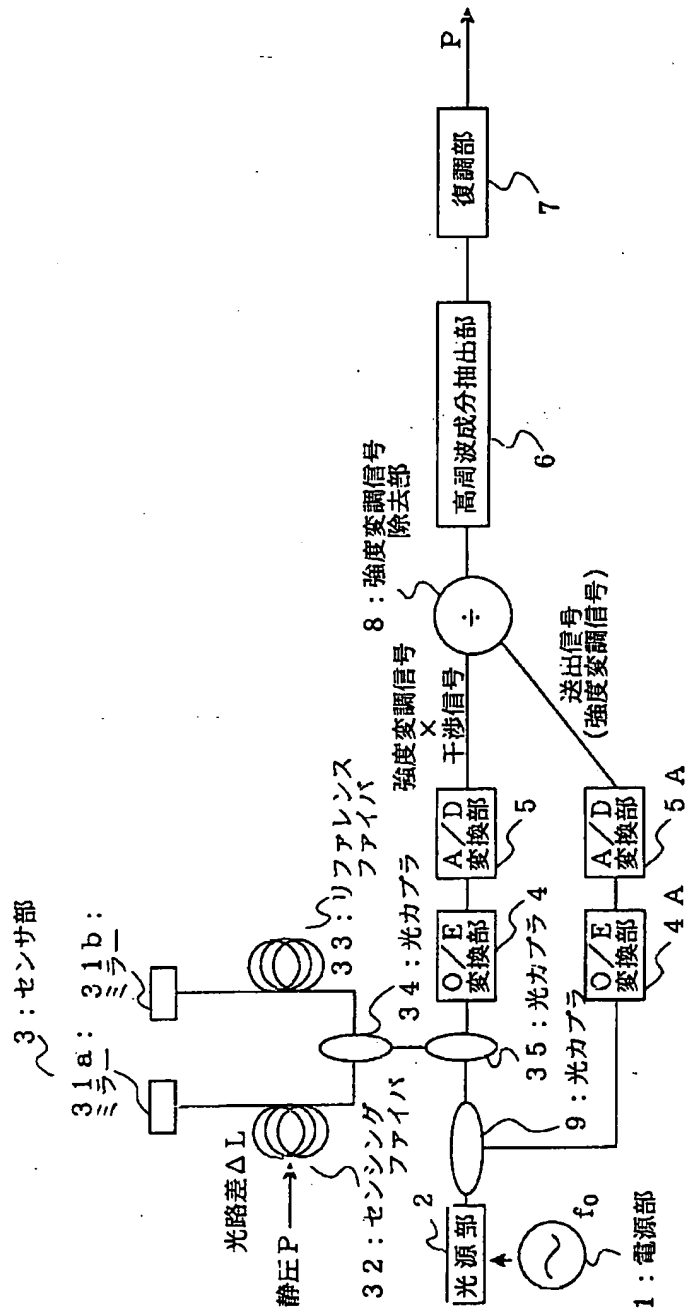
第4の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図5】



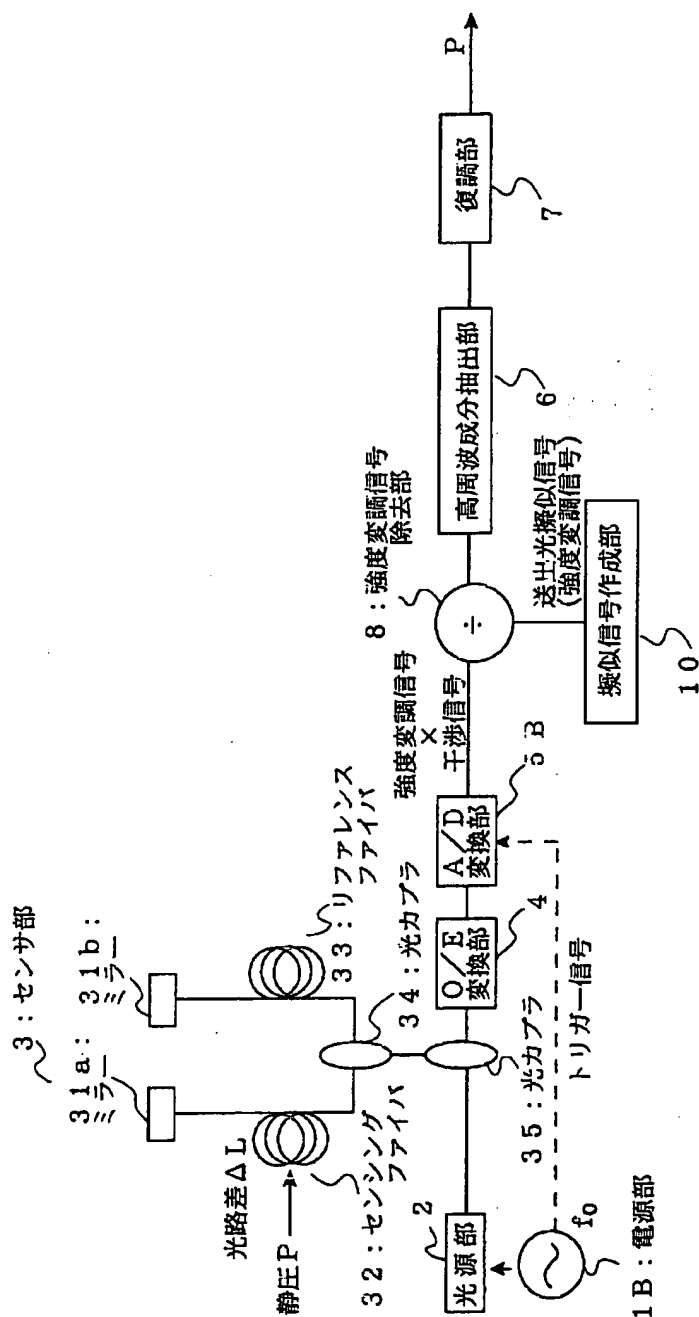
第5の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図6】



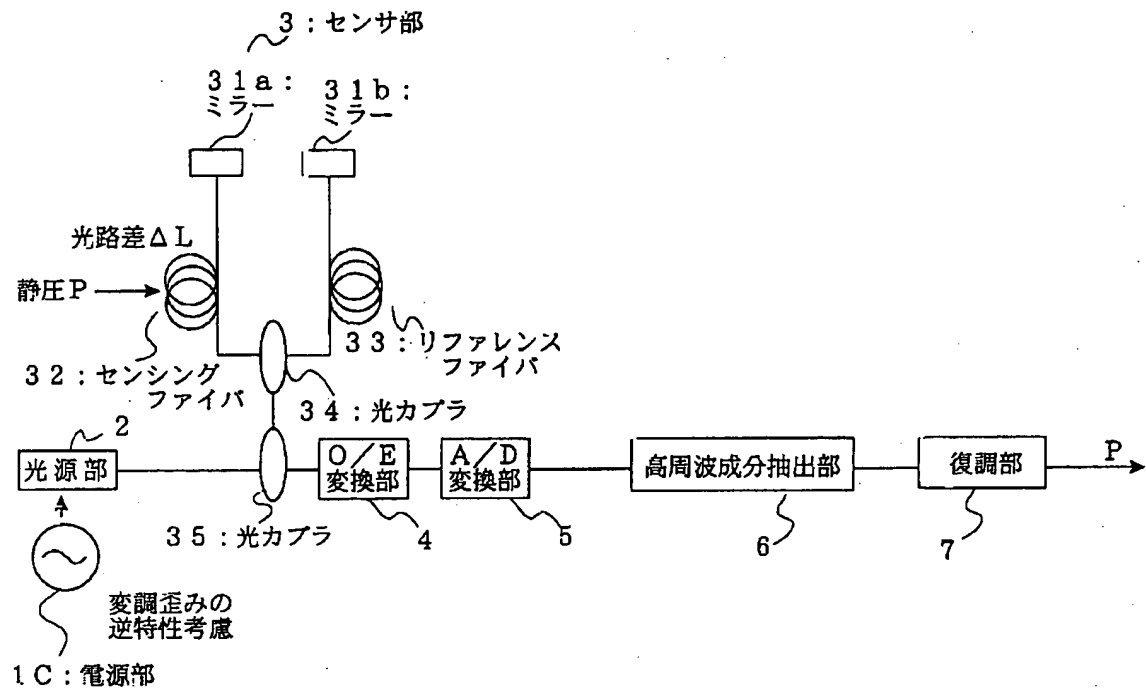
第6の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図7】



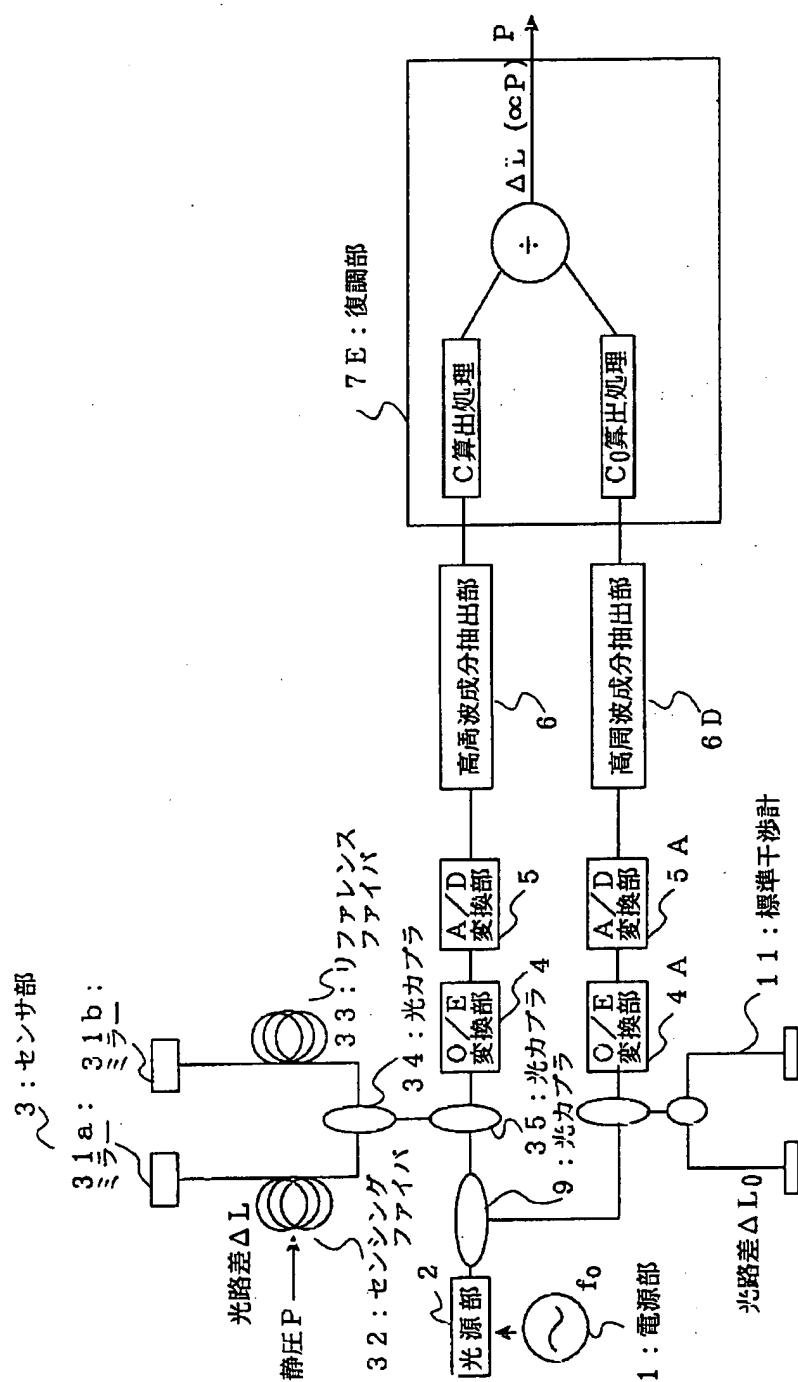
第7の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図8】



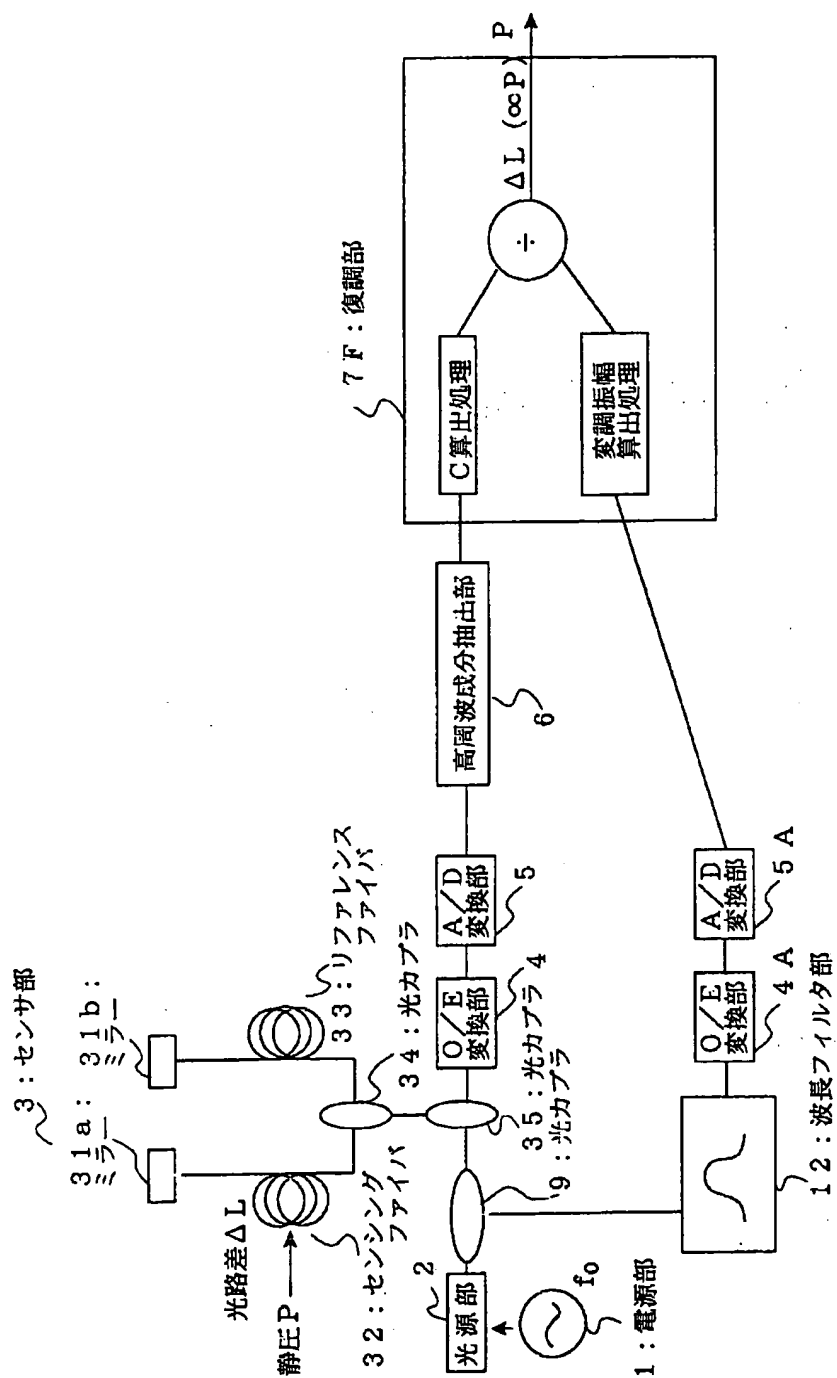
第 8 の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図9】



第9の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図

【図10】



第10の実施の形態に係る光ファイバセンサの構成図